

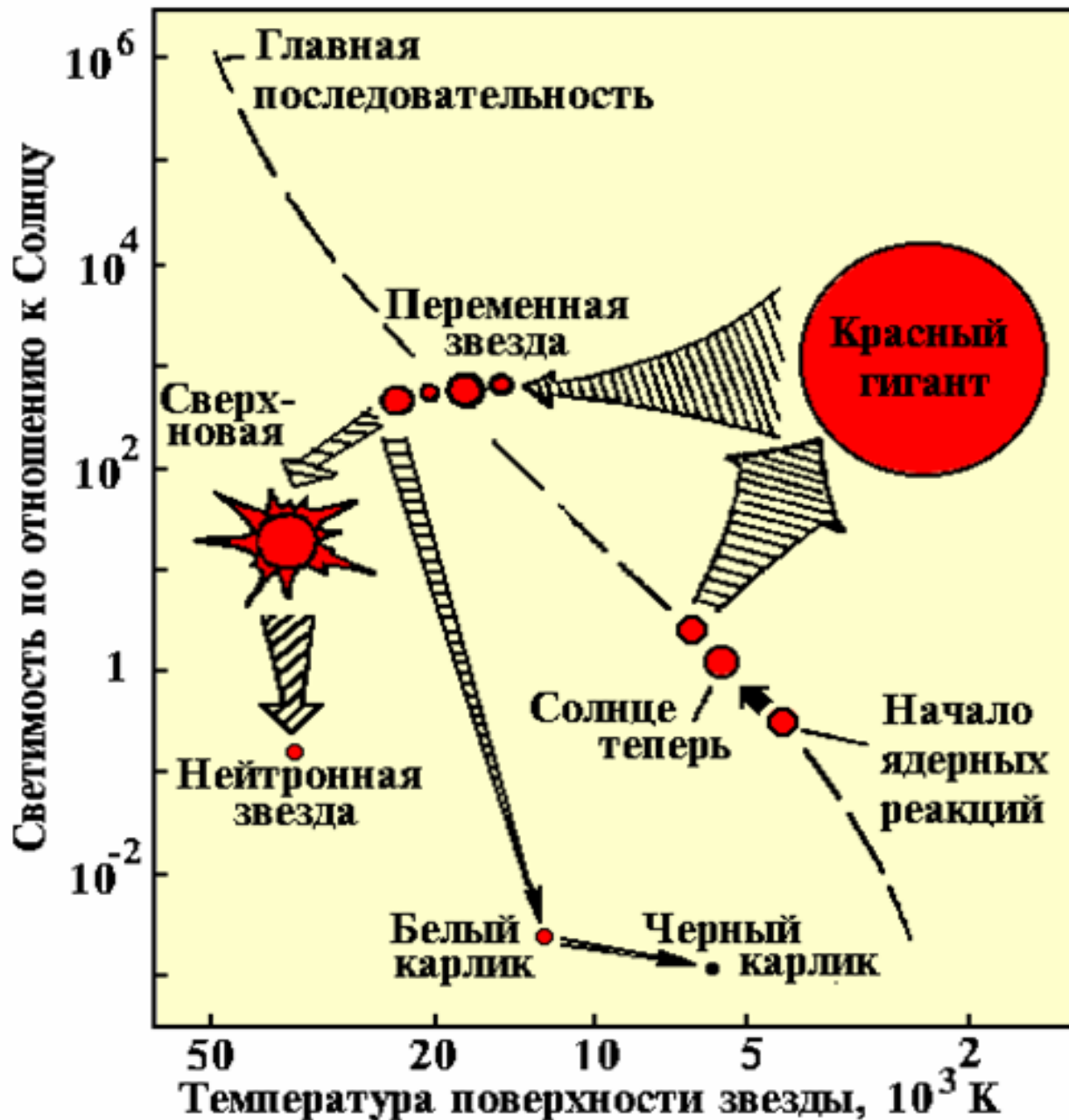
# Тайны атомных ядер

2017

# **ЗВЕЗДНЫЙ НУКЛЕОСИНТЕЗ**

**Образование тяжелых элементов**

# Диаграмма Герцшпрунга-Рассела



**диаграмма  
эволюции  
звезд**

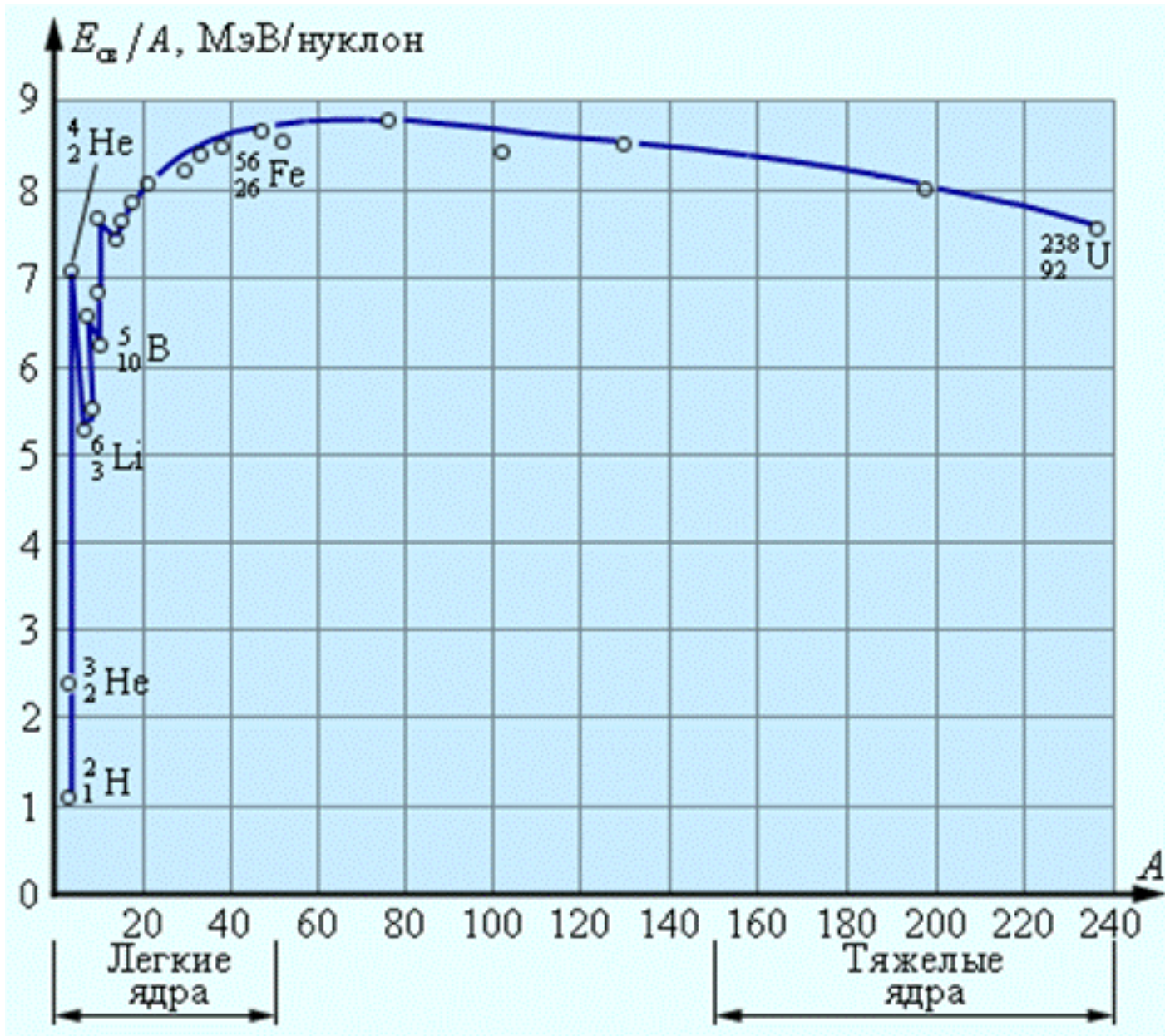
# Диаграмма Герцшпрунга-Рассела

$M / M_{\odot}$	Время достижения главной последовательности, лет	Время жизни на главной последовательности, лет
15	$6,2 \cdot 10^4$	$1,0 \cdot 10^7$
9	$1,5 \cdot 10^5$	$2,2 \cdot 10^7$
5	$5,8 \cdot 10^5$	$6,8 \cdot 10^7$
3	$2,5 \cdot 10^6$	$2,3 \cdot 10^8$
1,5	$1,8 \cdot 10^7$	$1,7 \cdot 10^9$
1,0	$5,0 \cdot 10^7$	$8,2 \cdot 10^9$
0,5	$1,5 \cdot 10^8$	$5,0 \cdot 10^{10}$

## Ядерные реакции синтеза в звёздах различной массы

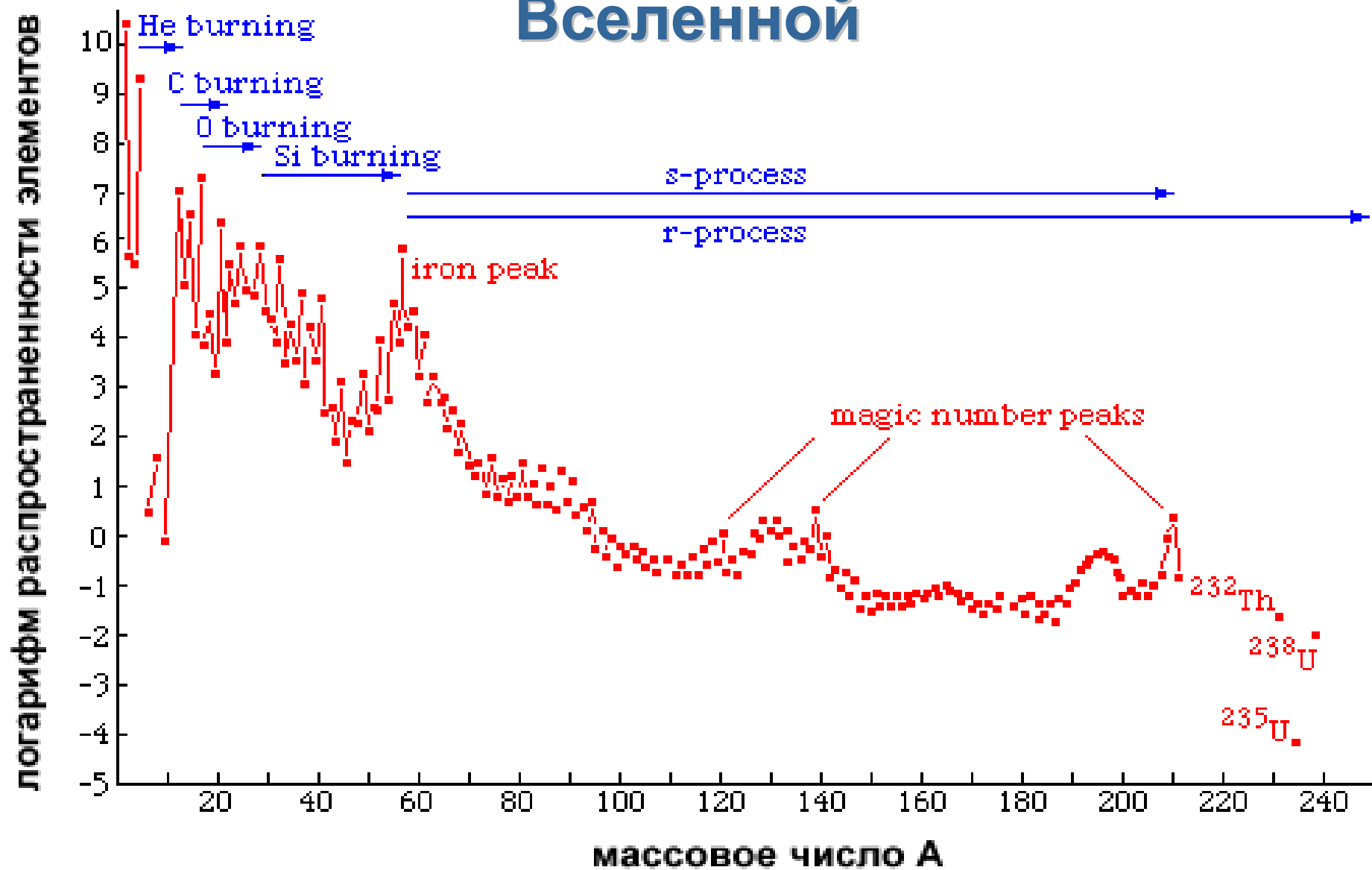
Масса, $M_{\odot}$	Возможные ядерные реакции
0.08	Нет
0.3	Горение водорода
0.7	Горение водорода и гелия
5.0	Горение водорода, гелия, углерода
25.0	Все реакции синтеза с выделением энергии

# Предел термоядерного синтеза



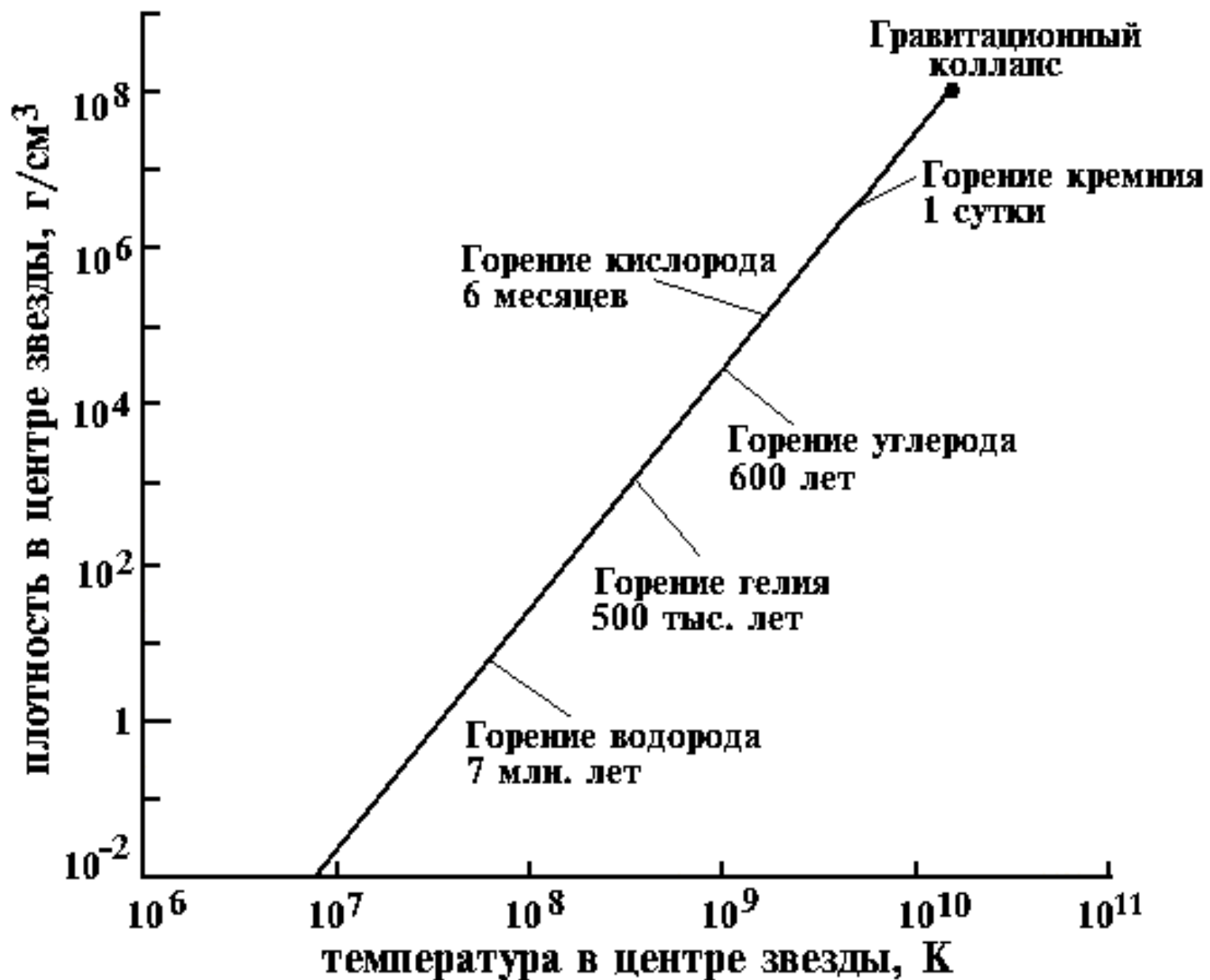
удельная  
энергия  
связи  
атомных  
ядер

# Распространенность нуклидов во Вселенной



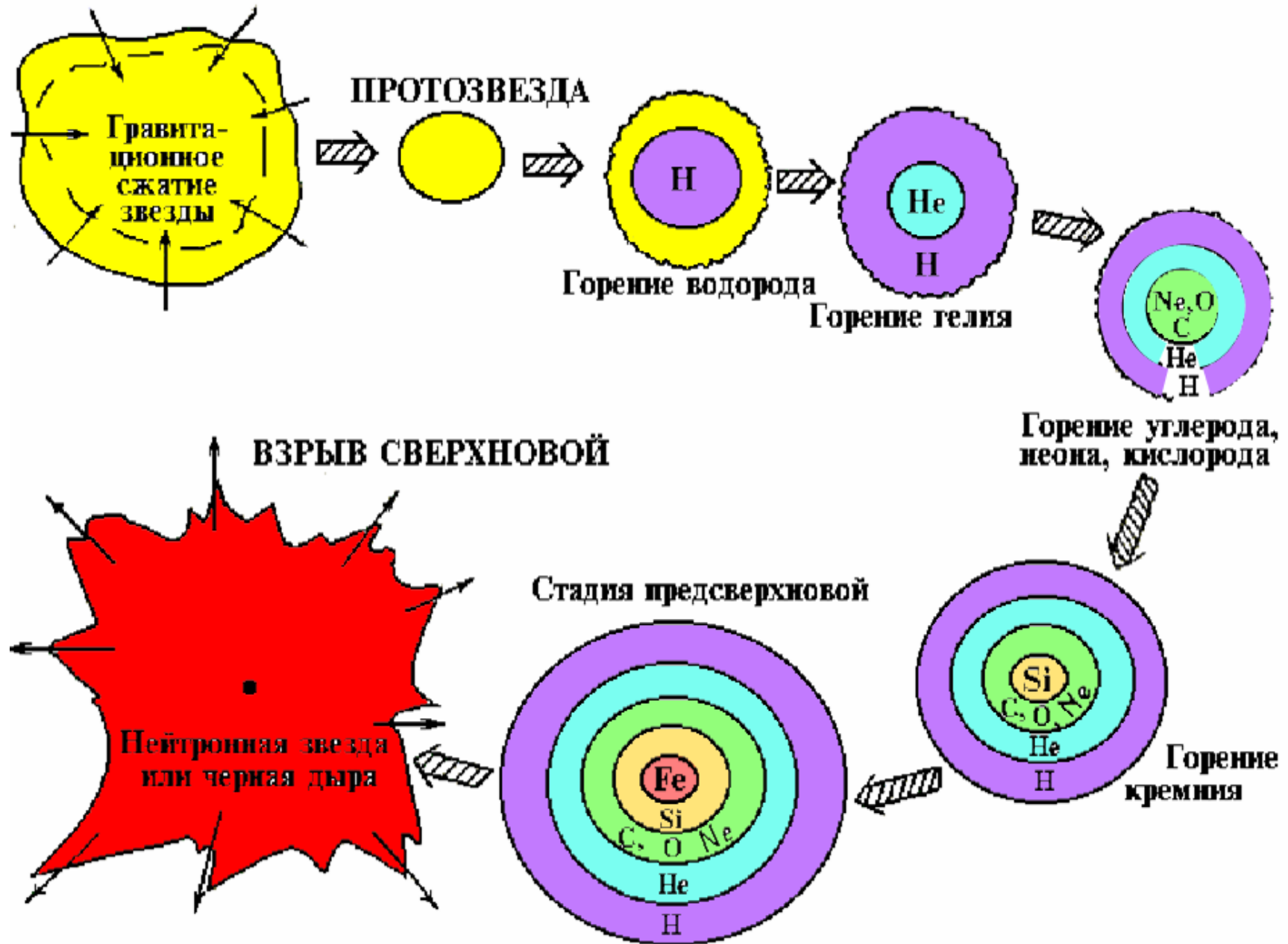
Распространенность Si принята равной  $10^6$ .

# Эволюция массивной звезды $M > 25 M_{\odot}$





# Эволюция массивной звезды $M > 25 M_{\odot}$



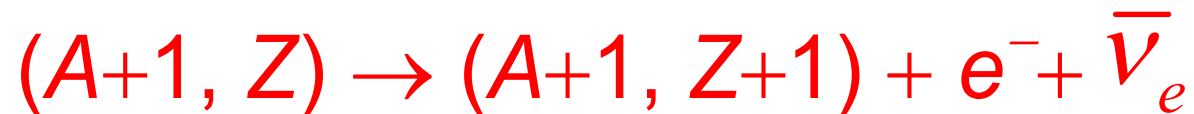
**s – процесс**

# s – процесс

Для образования тяжёлых элементов решающую роль играет захват ядрами нейтронов – реакция  $(n, \gamma)$ :



Если образовавшееся в результате захвата нейтрона ядро  $(A+1, Z)$  нестабильно, то при малых плотностях нейтронов  $\beta^-$ -распад этого ядра



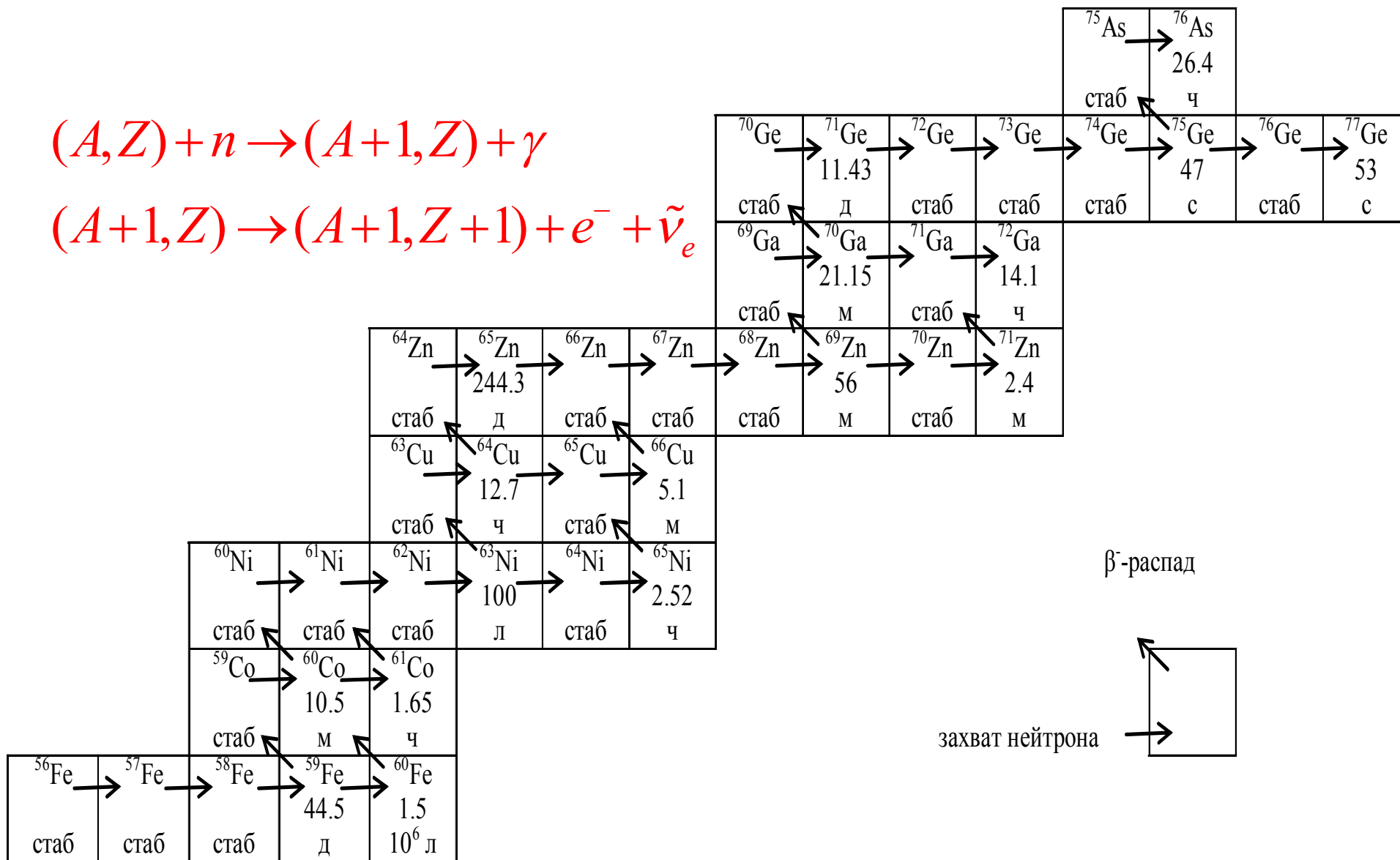
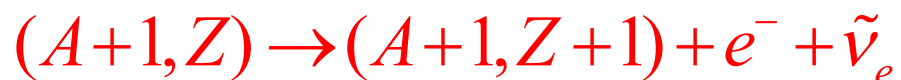
более вероятен, чем захват им следующего нейтрона.

$$\tau_{n\gamma} \gg \tau_{\beta},$$

$\tau_{n\gamma}$  — время жизни ядра до захвата нейтрона. Такой процесс называют *медленным* или *s-процессом* (от англ. *slow*).

Характерные значения  $\tau_{n\gamma}$  – годы.

# s – процесс

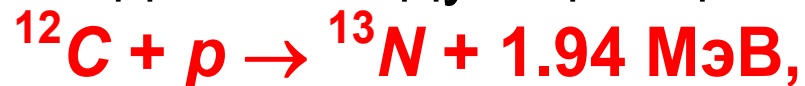


## Нейтроны для s - процесса

Подходящие условия для образования ядер в s-процессе существуют в красных гигантах. Источником нейтронов для s-процесса являются реакции



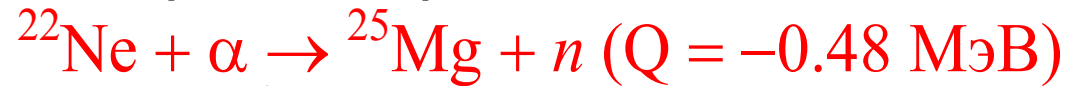
Для первой реакции требуются условия, при которых происходит совместное горение водорода и гелия. В качестве механизма, создающего такие условия, рассматривается соприкосновение конвективной оболочки звезды, в которой происходит горение гелия, с богатой водородом внешней оболочкой. Образование нейтронов происходит в следующей цепочке реакций:



Реакция  ${}^{13}\text{C} + \alpha \rightarrow {}^{16}\text{O} + n$  эффективно происходит при  $T > 10^8 \text{ К}$ .

# Нейтроны для s - процесса

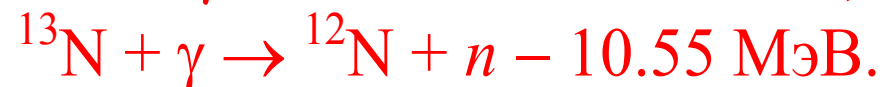
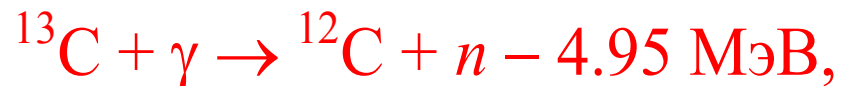
Образование нейтронов в реакции



зависит от наличия  ${}^{14}\text{N}$  в зоне горения гелия. Источником ядер  ${}^{14}\text{N}$  является CNO-цикл.



Ещё одним источником нейтронов с необходимой плотностью при  $T \approx 10^8 \text{ К}$  могут быть фотонейтронные реакции:



Роль фотонейтронных реакций растёт с увеличением температуры.

**r – процесс**

# r - процесс

Если плотности нейтронов  $\rho_n$  достигают значений  $10^{19} \div 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , то время жизни ядра до захвата нейтрона  $\tau_{n\gamma}$  снижается до  $\approx 10^{-3} \text{ с}$

$$1 / \tau_{n\gamma} = \rho_n \cdot v_n \cdot \sigma_{n\gamma}.$$

Выполняется условие

$$\tau_{n\gamma} \ll \tau_{\beta}.$$

Скорость захвата ядром нейтрона во много раз превышает скорость его  $\beta$ -распада. Захват нейтронов происходит до тех пор, пока скорость реакции  $(n, \gamma)$  не станет меньше скорости  $\beta$ -распада изотопа. При этом ядро успевает захватить 10-20 нейтронов прежде чем испытает  $\beta$ -распад. Такой процесс называют **быстрым** или **r-процессом** (от англ. *rapid*).

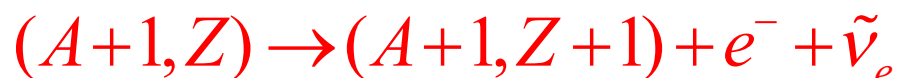
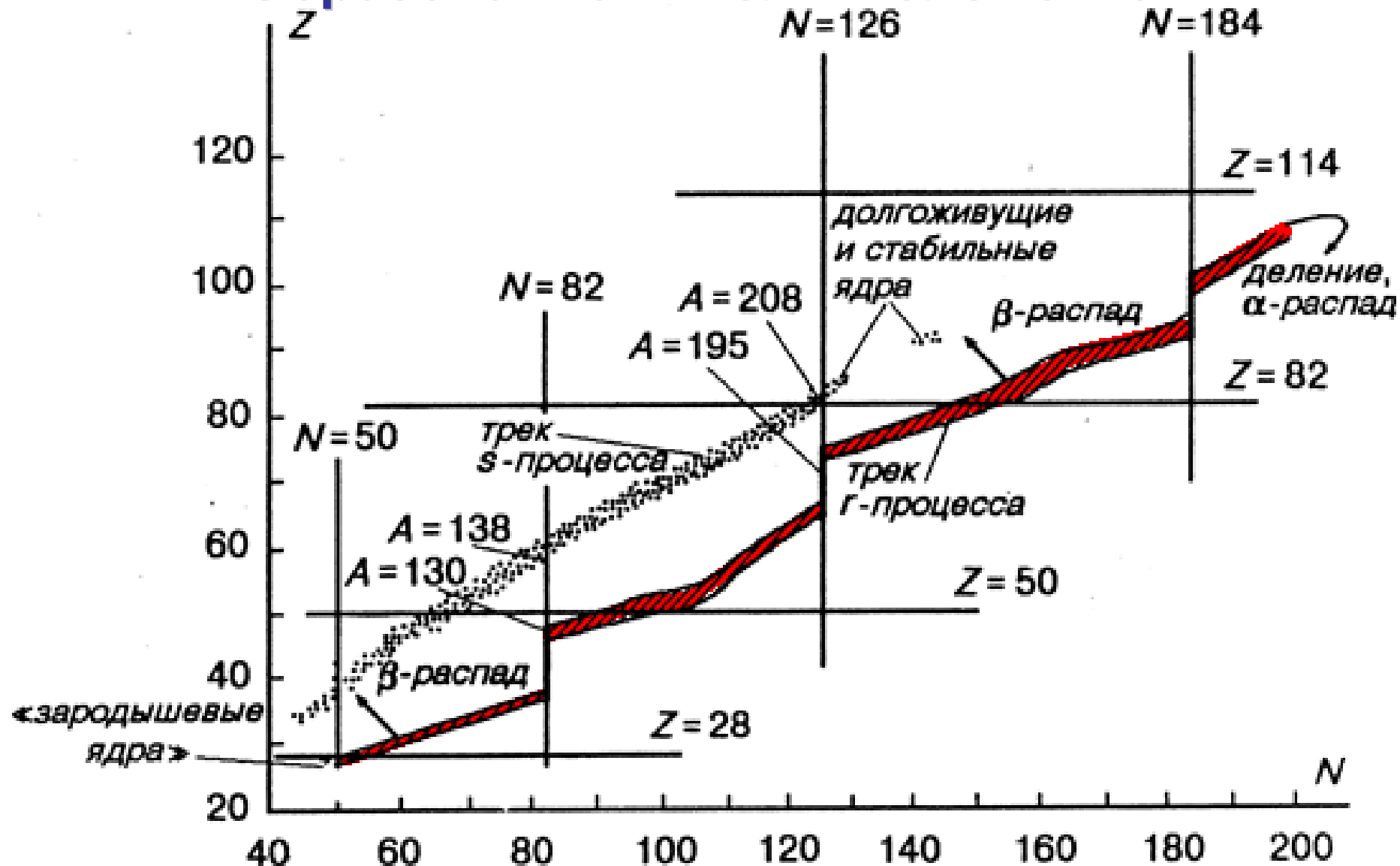


# r - процесс

Необходимые для r-процесса плотности нейтронов возникают при взрывах Сверхновых. Расходящаяся ударная волна примерно за 0,5 с создаёт в оболочке горения гелия условия для интенсивного протекания реакции генерации нейтронов  $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$  и тем самым запускает r-процесс.

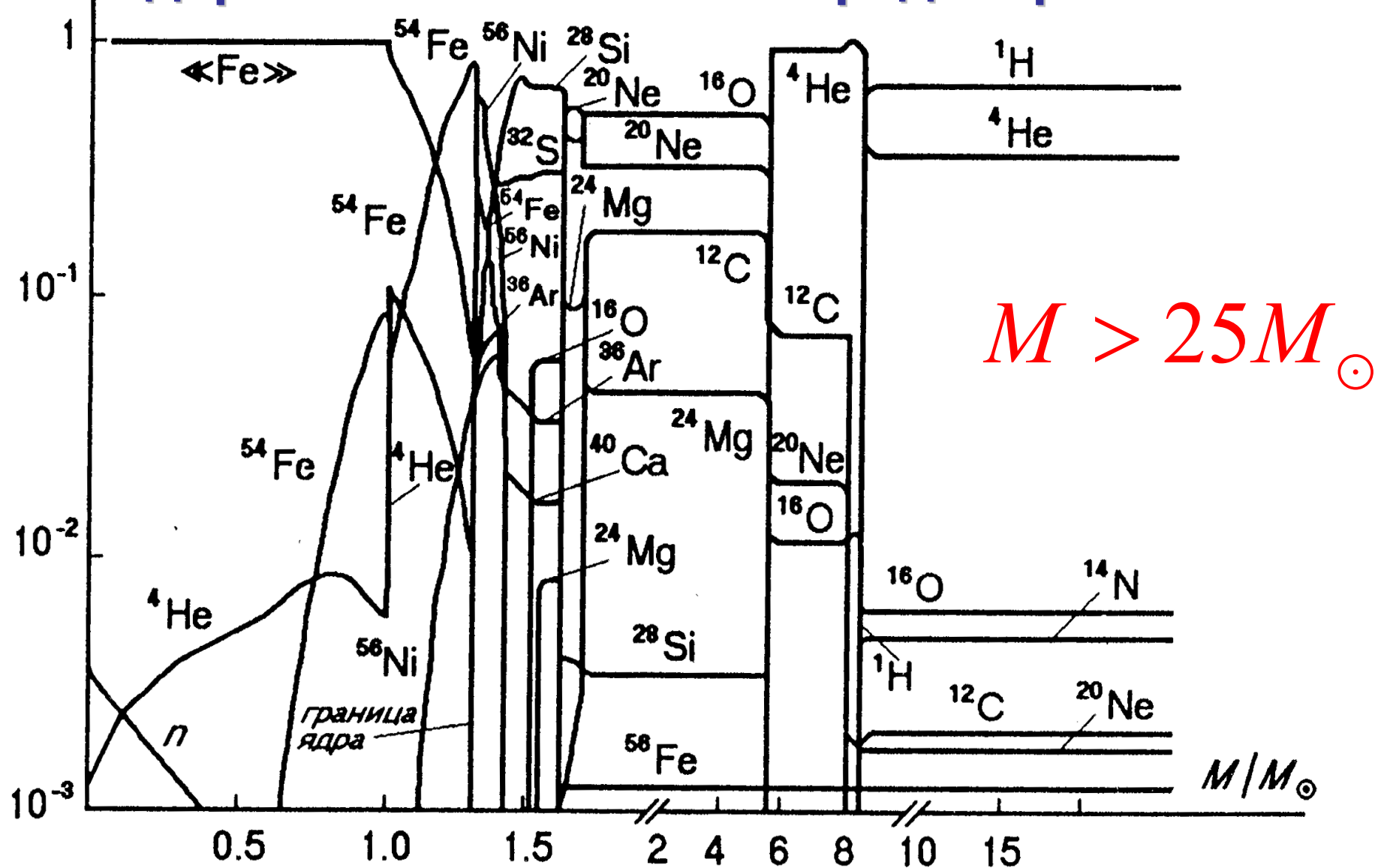
Этот механизм образования элементов называют *взрывным нуклеосинтезом*. r-процесс может протекать и в насыщенных нейтронами ядрах Сверхновых. В этом случае вынос образованных элементов в поверхностные слои звезды, осуществляется за счёт разогретых нейтрино участков звезды.

# Образование тяжелых элементов



# **Взрыв Сверхновой**

# Содержание элементов в предсверхновой



Распределение элементов соответствует стадии предсверхновой, когда с фоторасщепления железа под действием  $\gamma$ -квантов начинается охлаждение и сжатие центральной части звезды с последующим взрывом сверхновой.

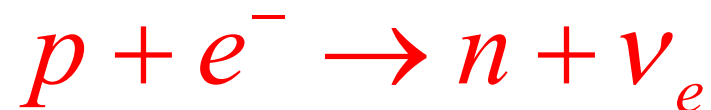
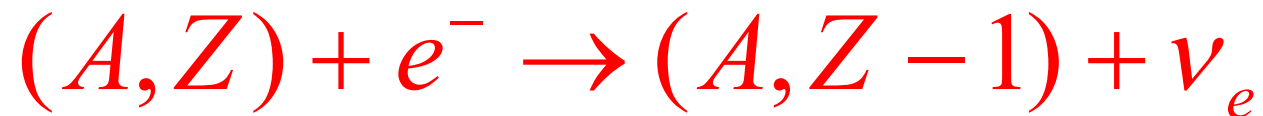
# Фоторасщепление железа

При температуре  $5 \cdot 10^9$  К существенную роль начинают играть реакции фоторасщепления железа на нейтроны, протоны и ядра гелия. Эти реакции протекают с поглощением энергии. Начинается охлаждение центральной части звезды.



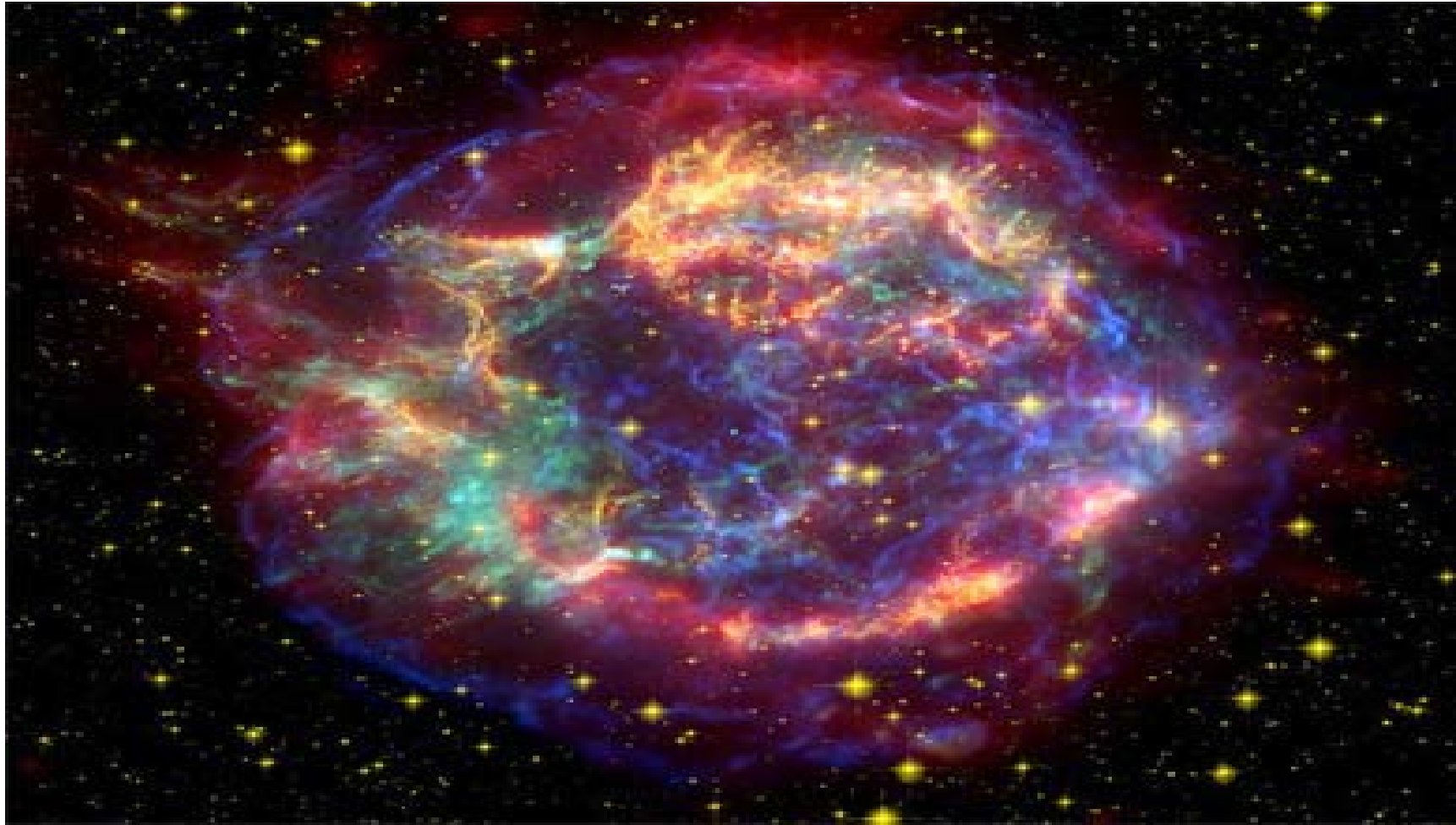
# Нейтронизация вещества

Наряду с процессом фоторасщепления железа существенную роль начинают играть процессы, происходящие в результате слабого взаимодействия, которые также приводят к охлаждению центральной части звезды. Энергию из центральной части звезды уносят **нейтрино**:



Происходит обогащение элементов центральной части звезды нейтронами. Этот процесс называется нейтронизацией вещества.

# Сверхновая



Инфракрасный снимок остатка вспышки сверхновой в созвездие Кассиопея, которая произошла приблизительно 500 лет назад. Это самый молодой остаток от взрыва Сверхновой, известный в нашей галактике.

# **Космическое излучение**





**В. Гесс  
(1883-1964)**

**1912 г. — Космические лучи** открыты В. Гессом с помощью ионизационной камеры, установленной на воздушном шаре.

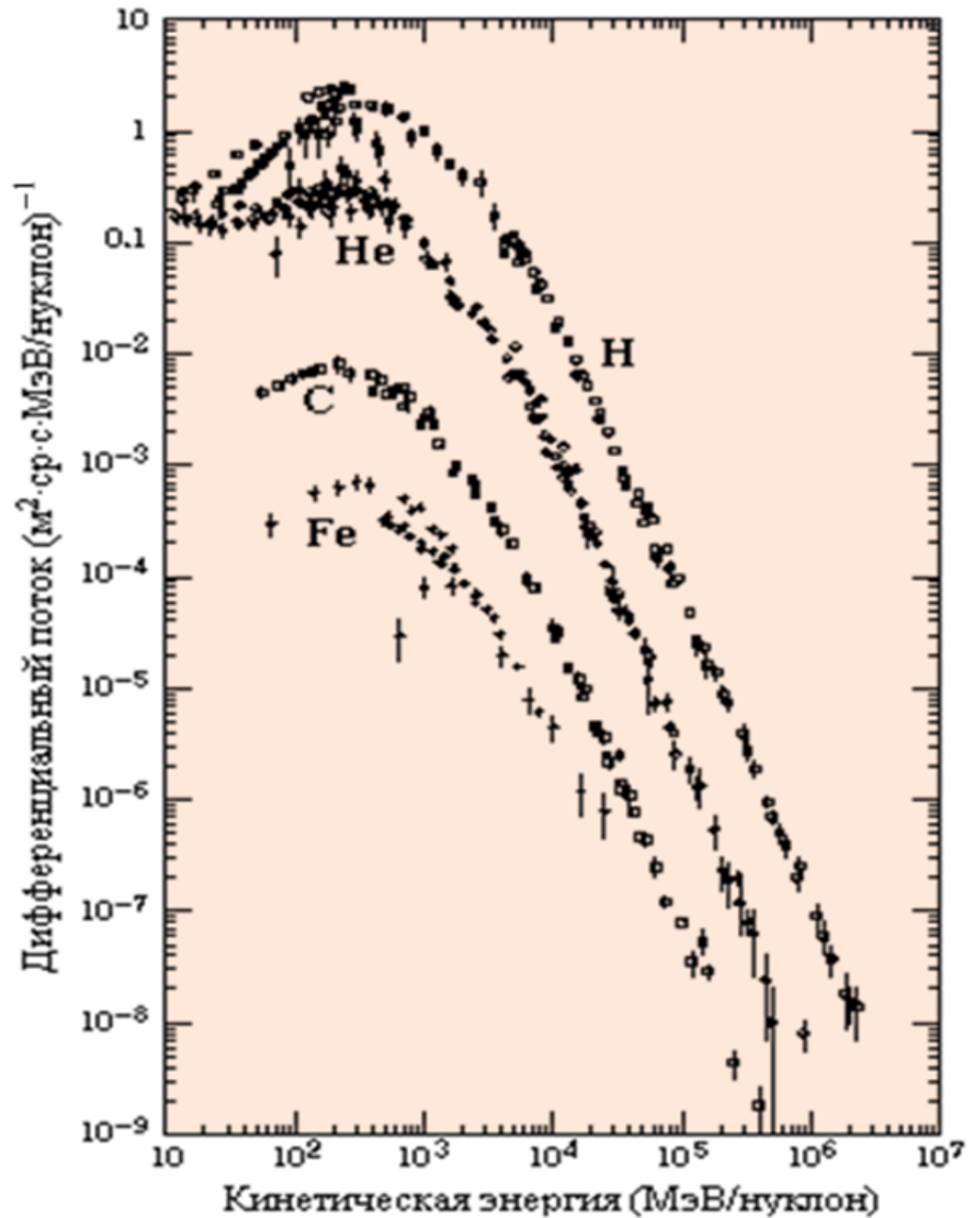
**Нобелевская премия по физике  
1936 г. — В. Гесс**  
За открытие космического излучения



# Первичные космические лучи

	Галактические космические лучи	Солнечные космические лучи
Поток	$\approx 1 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	Во время солнечных вспышек может достигать $\approx 10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
Состав	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Ядерная компонента (<math>\approx 90\%</math> протонов, <math>\approx 10\%</math> ядер гелия, <math>\approx 1\%</math> более тяжелых ядер),</li><li>2. Электроны (<math>\approx 1\%</math> от числа ядер),</li><li>3. Позитроны (<math>\approx 10\%</math> от числа электронов),</li><li>4. Антиадроны (<math>&lt; 0.01\%</math>)</li></ol>	98–99% протоны, $\approx 1.5\%$ ядра гелия
Диапазон энергий	$10^6 - 10^{21}$ эВ	$10^5 - 10^{11}$ эВ

# Космические лучи



# X-процесс

Изотопы **Li**, **Be**, **B** образуются в реакциях расщепления (скалывания) при взаимодействии галактических космических лучей с веществом межзвёздной среды:

1) лёгкая компонента космических лучей (быстрые протоны и  $\alpha$ -частицы) в результате столкновения с тяжёлыми ядрами межзвёздной среды вызывает расщепление их с образованием изотопов **Li**, **Be**, **B**, которые затем смешиваются с межзвёздной средой;

2) быстрые ядра **C**, **N**, **O**, входящие в состав космического излучения, сталкиваясь с ядрами **H** и **He**, превращаются в **Li**, **Be**, **B**.

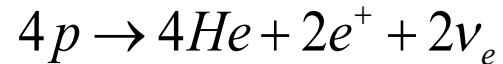
# Каскад вторичных космических частиц в атмосфере Земли



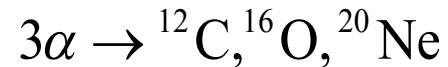
$(T_{1/2} = 5700 \text{ лет})$

# Ядерные реакции в звездах

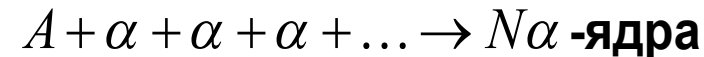
- Горение водорода. CNO-цикл



- Горение гелия.

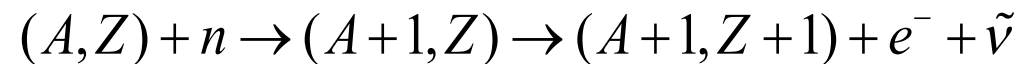


- $\alpha$ -процесс. Образование  $A/\alpha$ -ядер

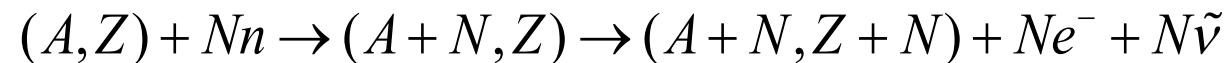


- E-процесс. Образование ядер в районе железного максимума в условиях термодинамического равновесия.

- s-процесс. Захват нейтронов происходит медленнее (slow), чем  $\beta$ -распад в последовательности процессов



- r-процесс. . Захват нейтронов происходит быстрее (rapid), чем  $\beta$ -распад в последовательности процессов



- p-процесс. Реакции образования лёгких изотопов химического элемента  
 $(p, n) (p, \gamma) (\gamma, n) (\gamma, 2n)$

- x-процесс. Реакции под действием космических лучей.

Li, Be, B.

# Происхождение элементов

		<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px; background-color: #f0f0f0;"> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="background-color: #ccccff; padding: 5px; text-align: center;">B</td> <td style="padding: 5px;">Big Bang</td> <td style="background-color: #90ee90; padding: 5px; text-align: center;">L</td> <td style="padding: 5px;">Large stars</td> <td style="background-color: #ffcc99; padding: 5px; text-align: center;">s</td> <td style="padding: 5px;">Super-novae</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #add8e6; padding: 5px; text-align: center;">C</td> <td style="padding: 5px;">Cosmic rays</td> <td style="background-color: #ffff99; padding: 5px; text-align: center;">s</td> <td style="padding: 5px;">Small stars</td> <td style="background-color: #cc99ff; padding: 5px; text-align: center;">M</td> <td style="padding: 5px;">Man-made</td> </tr> </table> </div> </div>																B	Big Bang	L	Large stars	s	Super-novae	C	Cosmic rays	s	Small stars	M	Man-made	
B	Big Bang	L	Large stars	s	Super-novae																									
C	Cosmic rays	s	Small stars	M	Man-made																									
H B																	He B													
Li C	Be C											B C	C s L	N s L	O s L	F L	Ne s L													
Na L	Mg L											Al s L	Si s L	P L	S s L	Cl L	Ar L													
K L	Ca L	Sc L	Ti s L	V s L	Cr L	Mn L	Fe s L	Co s	Ni s	Cu L	Zn L	Ga s	Ge s	As L	Se s	Br s	Kr s													
Rb s	Sr L	Y L	Zr L	Nb L	Mo s L	Tc L	Ru s L	Rh s	Pd s L	Ag s L	Cd s L	In s L	Sn s L	Sb s	Te s	I s	Xe s													
Cs s	Ba L		Hf s L	Ta s L	W s L	Re s	Os s	Ir s	Pt s	Au s	Hg s L	Tl s L	Pb s	Bi s	Po s	At s	Rn s													
Fr s	Ra s		La L	Ce L	Pr s L	Nd s L	Pm s L	Sm s L	Eu s	Gd s	Tb s	Dy s	Ho s	Er s	Tm s	Yb s L	Lu s													
			Ac s	Th s	Pa s	U s	Np s	Pu s	Am M	Cm M	Bk M	Cf M	Es M	Fm M	Md M	No M	Lr M													



**Hans Albrecht Bethe  
(1906-2005)**

**Нобелевская премия по физике**

**1967 г. — Г. Бете**

За вклад в теорию ядерных реакций, и особенно за открытие источника энергии звезд.

1938 г. —

Ганс Бете (Hans Bethe) и Чарльз Критчфильд (Charles Critchfield) открыли протон-протонный цикл термоядерных реакций как источник энергии звезд.

Ганс Бете (Hans Bethe) и Карл фон Вайцзеккер (Carl von Weizsacker) открыли углеродно-азотный цикл термоядерных реакций.





**William Alfred Fowler**  
(1911-1995)

Для определения эффективности ядерных реакций в звездах обычно проводится экстраполяция результатов измерений при больших энергиях в область энергий несколько кэВ. Большое число очень тщательных экспериментов было выполнено под руководством В. Фаулера.

**Нобелевская премия по физике**

**1983 г.** — В. Фаулер

За теоретические и экспериментальные исследования ядерных процессов важных при образовании химических элементов во Вселенной.